

УДК 551.513.2+510.42

## Химический состав атмосферного аэрозоля в арктическом районе и прилегающих морях по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг.

Л.П. Голобокова<sup>1</sup>, Т.В. Ходжер<sup>1</sup>, О.Н. Изосимова<sup>1</sup>, П.Н. Зенкова<sup>2</sup>,  
А.О. Почуфаров<sup>2</sup>, О.И. Хуриганова<sup>1</sup>, Н.А. Онищук<sup>1</sup>,  
И.И. Маринайте<sup>1</sup>, В.В. Польшкин<sup>2</sup>, В.Ф. Радионов<sup>3</sup>,  
С.М. Сакерин<sup>2</sup>, А.П. Лисицын<sup>4</sup>, В.П. Шевченко<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Лимнологический институт СО РАН

664033, г. Иркутск, ул. Уланбаторская, 3

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>3</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

<sup>4</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36

Поступила в редакцию 27.01.2020 г.

Рассматривается химический состав (ионы, элементы, полициклические ароматические углеводороды) атмосферного аэрозоля в различных районах Северной Арктики, европейской и российской частях Северного Ледовитого океана (СЛО), морях северных широт и Дальнего Востока. Исследования выполнялись с морских судов по маршрутам их следования (НИС «Академик Мстислав Келдыш», НЭС «Академик Трешников», НИС «Профессор Мультановский»). Пробы воздуха отбирались по методике, принятой в международных сетях программ мониторинга атмосферы в Юго-Восточной Азии (EANET) и Европе (EMEP). Средняя сумма концентраций ионов и отдельных ионов в аэрозоле над морями Северной Атлантики и европейской частью СЛО согласуется с измерениями в море Лаптевых и Карском море в 2018 и 2019 гг. Повышенные значения ПАУ в аэрозоле морей и СЛО центральной части Российской Арктики совпадают с повышенными концентрациями ионов и микроэлементов в составе аэрозоля. Отмечается различие в распределении концентраций микроэлементов в составе аэрозолей морей Северной Атлантики и центрального района Российской Арктики, что может свидетельствовать о разных источниках этих компонентов.

*Ключевые слова:* атмосферный аэрозоль, арктические моря, Северная Атлантика, химический состав; atmospheric aerosol, Arctic seas, North Atlantic, chemical composition.

### Введение

Изучение пространственно-временного распределения приземного аэрозоля становится все более актуальным в свете его влияния на изменение климата. Известно, что инсоляция зависит от состава атмосферы и, прежде всего, от наличия аэрозолей, которые поглощают и рассеивают солнечную радиацию, уменьшая тем самым величину потока, приходящего на подстилающую поверхность [1–3].

В последние десятилетия парниковый эффект стал важной научной и политической проблемой [4–6]. Особенно чувствительны к изменению климата регионы высоких южных и северных широт [7, 8].

Многолетние ряды наблюдений за изменением химического состава атмосферного аэрозоля в арктическом районе свидетельствуют о переносе широкого спектра основных примесей, к которым относятся пыль, оксид углерода, оксиды и диоксиды серы и азота, сажа, и специфических веществ, попадающих в атмосферу в результате аварийных

\* Людмила Петровна Голобокова (lg@lin.irk.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Оксана Николаевна Изосимова (izosimova@lin.irk.ru); Полина Николаевна Зенкова (zpn@iao.ru); Антон Олегович Почуфаров (poa@iao); Ольга Иннокентьевна Хуриганова (khuriganowa@lin.irk.ru); Наталья Анатольевна Онищук

(onisshuk@lin.irk.ru); Ирина Изосимова Маринайте (marin@lin.irk.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Владимир Федорович Радионов (vradion@aari.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Александр Петрович Лисицын; Владимир Петрович Шевченко (vshevch@ocean.ru).

или залповых выбросов [9–13]. Исследование химического состава ледяных и снежных кернов позволяет обнаружить как следы извержения вулканов, так и выпадения продуктов ядерных испытаний [14, 15]. Изменение состава атмосферных выпадений ведет к нарушениям функционирования наземных и водных экосистем, многочисленные примеры которых известны не только в Европе и Северной Америке, но и в России [16–20].

Для полного представления о пространственных и временных неоднородностях химического состава аэрозоля во всем арктическом районе стационарных измерений недостаточно. Большое значение имеют измерения, выполненные в экспедиционных рейсах исследовательских судов. В настоящей работе рассматривается химический состав атмосферного аэрозоля, отобранного в 2018–2019 гг. на маршрутах 71-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», морской экспедиции «Арктика-2018», НЭС «Академик Трешников» и НИС «Профессор Мультиановский» (4-й этап экспедиции «Трансарктика-2019»).

## 1. Материалы и методы исследования

71-й экспедиционный рейс на НИС «Академик Мстислав Келдыш» состоялся 24 июня – 15 августа 2018 г. Измерения выполнялись в атмосфере Северной Атлантики и европейской части Северного Ледовитого океана (СЛО). Было собрано 22 пробы (№ 1К–22К) атмосферного аэрозоля для анализа ионного и микроэлементного составов (рис. 1). С 12 августа по 29 сентября 2018 г. в рамках совместной российско-американско-германской морской экспедиции «Арктика-2018» проводились научные исследования в российской части Арктики на НЭС «Академик Трешников» от Баренцева до Восточно-Сибирского моря. Собрано 19 проб (№ 1Т–19Т) атмосферного аэрозоля для определения ионов, микроэлементов и полиароматических углеводоро-

дов (ПАУ). По Северному морскому пути от Владивостока до Мурманска на НИС «Профессор Мультиановский» в 2019 г. собрано 14 проб (№ 1М–14М) аэрозоля для исследования ионного и микроэлементных составов.

Пробы атмосферного аэрозоля собирались путем принудительной прокачки воздуха через фильтры с использованием насоса мембранного типа и газового счетчика. Для исследования ионного и микроэлементного составов пробы собирали на тефлоновые фильтры (PTFE) с диаметром пор 0,8 мкм. Вещества с фильтров экстрагировали деионизированной водой в ультразвуковой бане в течение 30 мин. Экстракты фильтровали через ацетат-целлюлозные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм. В фильтрате измерялись концентрации ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  с точностью до 2–8% методом ионной хроматографии на ионной системе ICS-3000 (Dionex Corporation, США). Микроэлементы Li, Be, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, W, Pb, Th, U, Ag, Tl, Na, Mg, K, Ca экстрагировали концентрированной  $\text{HNO}_3$  в микроволновой печи, экстракт разбавляли деионизированной водой и анализировали методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре Agilent 7500ce (США) [21]. Для определения ПАУ пробы аэрозоля собирали на стекловолокнистые фильтры фирмы Sartorius. Концентрации ПАУ в аэрозоле определяли методом внутренних стандартов нафталина-d8, аценафтена-d10, фенатрена-d10, хризена-d12 и перилена-d12 на хромато-масс-спектрометре Agilent, GC System 7890B, 7000 CGC/MS Triple Quad. Качество выполняемых анализов неоднократно подтверждалось участием в межлабораторных сравнительных испытаниях, результаты которых вошли в ежегодные отчеты Глобальной службы атмосферы ВМО [22] и отчеты сети мониторинга атмосферных выпадений Юго-Восточной Азии EANET [23].



Рис. 1. Схема движения морских экспедиционных судов: I – маршрут 71-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», II – маршрут НЭС «Академик Трешников», III – маршрут НИС «Профессор Мультиановский»; 1К–22К, 1Т–19Т, 1М–14М – номера проб

## 2. Обсуждение результатов

### 2.1. Химический состав аэрозоля в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш»

Суммы концентраций ионов в аэрозоле изменялись в трех диапазонах: 1,0–2,0, 2,3–2,7 и 3,0–3,6 мкг/м<sup>3</sup>. Высокие концентрации (4,2, 6,5 и 18,7 мкг/м<sup>3</sup>) зафиксированы в пробах № 3К (26–27 июня), № 6К (30 июня – 3 июля) и № 8К (5 июля) соответственно, собранных в Северном море у Скандинавского п-ова и по широтному разрезу Гольфстрима (~59° с.ш.). Анализ карты пожаров [24] и обратных траекторий переноса воздушных масс от 26–27 июня указал на их поступление с территории Великобритании и опускание в приземный слой в районе измерений (рис. 2, [25]). Высокие концентрации ионов в составе проб № 6К и 8К также связаны с выносом в район исследований дымового аэрозоля, максимальное количество которого зафиксировано 14 июля [26], но с территориями США и Канады. Существующие модели переноса выбросов от лесных пожаров на территории Европы и североамериканского континента неплохо согласуются с экспериментальными данными [27, 28].

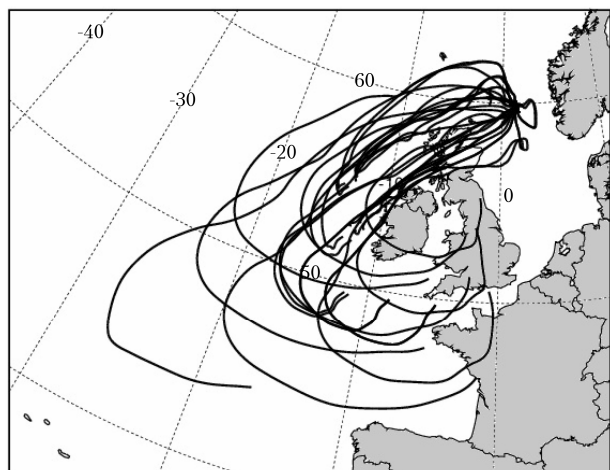


Рис. 2. Траектории движения воздушных масс, принесенных на высоту 10 м, при отборе пробы аэрозоля № 3К 26–27 июня в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш»

Аэрозоли с низкими концентрациями собраны в Балтийском море (№ 1К, 24–25 июня), в начале широтного разреза вдоль Гольфстрима (№ 4К–5К, 27–30 июня), у берегов Исландии (№ 15К–18К, 18–30 июля) и в южной части Норвежского моря (№ 20К, 2–3 августа) у берегов Скандинавского п-ова. Аэрозоли с суммой концентраций ионов 2,3–2,7 мкг/м<sup>3</sup> собраны над акваторией Балтийского моря (№ 2К, 25–26 июня), примыкающей к континенту, южнее Гренландии (№ 13К, 14К) и у берегов Исландии (№ 17К). Повышенные концентрации суммы ионов 3,0–3,6 мкг/м<sup>3</sup> содержались в аэрозоле, собранном у берегов Гренландии (№ 9К–12К), над акваторией Норвежского моря (№ 21К) и по северной части периметра Баренцева моря (№ 22К). В табл. 1 представлены средние концентрации ионов в составе аэрозоля, объединенные в зависимости от района измерений. Концентрации ионов варьируют в достаточно большом диапазоне. Несмотря на это, их различия в отдельных районах экспедиции оказались меньше среднеквадратических отклонений, и средние значения можно считать типичными для этого периода наблюдений. Наши исследования хорошо согласуются с данными физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля, измеренных в этом же рейсе [26].

Несмотря на влияние лесных пожаров, в аэрозоле преобладали ионы морского происхождения Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. В пробах с высокими суммами ионов возрастали концентрации Ca<sup>2+</sup> и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Используя закон Дитмара, провели количественную оценку различия соотношений концентраций Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> относительно Na<sup>+</sup> в аэрозоле (аэп) и морской воде (мв):

$$K_i = \left[ \frac{(C_i/\text{Na}^+)_{\text{аэп}}}{(C_i/\text{Na}^+)_{\text{мв}}} \right],$$

где (C<sub>i</sub>/Na<sup>+</sup>) – концентрация *i*-го элемента относительно Na<sup>+</sup>.

K<sub>i</sub> – это коэффициент обогащения (КО), который позволяет выявить дополнительный вклад ионов от разных источников в формирование химического состава аэрозоля [29]. Наибольшие коэффициенты выявлены для ионов K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Известно, что в зависимости от вида растения и экосистемы зола лесных пожаров обогащена такими неорганическими составляющими, как Ca, Mg, K [30, 31].

Таблица 1

Средние концентрации ионов в составе аэрозоля (мкг/м<sup>3</sup>) и сумма концентраций ионов (Σ<sub>ион</sub>) ± среднеквадратичные отклонения (в скобках указано число проб, отобранных в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш»)

Компонент	Балтийское море, Северное море (3)	Гольфстрим (16)	Норвежское море (2)	Баренцево море (1)	Среднее (22)
Na <sup>+</sup>	0,31 ± 0,07	0,89 ± 1,27	0,54 ± 0,59	0,61	0,59 ± 0,24
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,64 ± 0,26	0,63 ± 0,73	0,24 ± 0,08	0,74	0,56 ± 0,22
K <sup>+</sup>	0,05 ± 0,03	0,10 ± 0,11	0,09 ± 0,01	0,09	0,08 ± 0,02
Mg <sup>2+</sup>	0,02 ± 0,00	0,06 ± 0,09	0,04 ± 0,05	0,04	0,04 ± 0,02
Ca <sup>2+</sup>	0,03 ± 0,00	0,05 ± 0,08	0,04 ± 0,02	0,05	0,04 ± 0,01
Cl <sup>-</sup>	0,76 ± 0,51	1,58 ± 1,97	0,92 ± 0,86	0,89	1,04 ± 0,37
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,57 ± 0,15	0,05 ± 0,05	0,04 ± 0,03	0,03	0,17 ± 0,27
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,46 ± 0,30	0,30 ± 0,33	0,28 ± 0,01	0,58	0,41 ± 0,14
Σ <sub>ион</sub>	2,84 ± 1,21	3,66 ± 4,47	2,19 ± 1,43	3,03	2,93 ± 0,61

Рассмотрен микроэлементный состав аэрозоля. Преобладающий диапазон суммы микроэлементов в составе аэрозоля 48–77 нг/м<sup>3</sup>. Большие суммы микроэлементов содержались в пробах № 5К – 92 нг/м<sup>3</sup>, № 10К – 161 нг/м<sup>3</sup> и № 21К – 110 нг/м<sup>3</sup>. Минимальная сумма концентраций элементов, равная 48 нг/м<sup>3</sup>, наблюдалась в пробе № 16К, собранной у берегов Исландии. Как и для ионов, различия концентраций микроэлементов в отдельных районах исследования оказались меньше среднеквадратических отклонений, в связи с этим средние значения можно считать характерными для этого периода наблюдений (24 июня – 15 августа 2018 г.). На рис. 3 представлены средние концентрации микроэлементов по сравнению с концентрациями в пробах с максимальной (№ 8К) и минимальной (№ 16К) суммами микроэлементов. Очевидно, что наиболее высокие концентрации у Al, Fe, Zn. В пробе № 8К с максимальным значением суммы концентраций элементов наряду с Al, Fe, Zn определены повышенные концентрации Ti, Cr, Ni, Cu, Se, Cd, Sb, Ba, Pb.

Сравнение среднего ионного состава аэрозоля, собранного в период морской экспедиции, с измерениями на прибрежной ст. Кево в Северной Финляндии, расположенной на 350 км севернее полярного круга, выявило следующее [32]. В морском аэрозоле, как и на станции, наиболее высокие концентрации определены преимущественно для терригенных элементов Zn, Al, Ti, а также для Cu. Однако абсолютные концентрации элементов в составе аэрозоля прибрежной станции выше в 2–8 раз, чем в аэрозоле, собранном над морской поверхностью. Максимальное превышение концентраций было присуще элементам антропогенного характера: Mo – в 12,2, Cu – в 13,3, Sn – в 19,4, As – в 23,1 раза. Согласно исследованиям [12, 32–35] выбросы в атмосферу предприятий Кольского п-ова, Мурманской и Архангельской обл. являются основными источниками

поступления тяжелых металлов в Западную и Центральную Арктику.

Для определения степени влияния различных источников на обогащение элементов использовали кларки элементов в земной коре ( $K_i$ ) относительно Al по формуле [21, 36]:

$$K_i = [(C_i/Al)_{\text{аэроз.}}] / [(C_i/Al)_3],$$

где  $(C_i/Al)$  – концентрация  $i$ -го элемента относительно Al. Значительное обогащение относительно состава земной коры отмечено для Cr, B, Pb, Mo, Zn ( $K = 120$ – $800$ ), Cd – 3800, Sb – 6900 и Se – 41200. Наши данные согласуются с вариациями КО элементов в [26].

## 2.2. Химический состав аэрозоля в экспедиции «Арктика-2018»

В табл. 2 представлены средние концентрации ионов в составе аэрозоля, собранного над районами СЛО вдоль северных склонов арх. Новая Земля и Северная Земля (№ 1Т–4Т, 18–24 августа, район 1), над северо-западной частью Восточно-Сибирского моря и прилегающего СЛО (№ 8Т–12Т, 11–17 сентября, район 2), акваторией моря Лаптевых (№ 5Т–7Т, 26 августа – 10 сентября; № 13Т–16Т, 13–23 сентября, район 3) и над Карским морем и южной частью Баренцева моря (№ 17Т–19Т, 25–28 сентября, район 4) (см. рис. 1).

В пробах, собранных в районах 3 и 4, по сравнению с районами 1 и 2 сумма ионов выше в 3,4–5,1 раза, а концентрации отдельных ионов, за исключением  $\text{NO}_3^-$ , – в 2–10 раз. В районах 1 и 2 с диапазоном суммы концентраций ионов в аэрозоле 0,2–0,8 и 0,4–1,0 мкг/м<sup>3</sup> преобладали ионы  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ . Наблюдалась высокая корреляция концентраций пар ионов  $\text{NH}_4^+ - \text{SO}_4^{2-}$

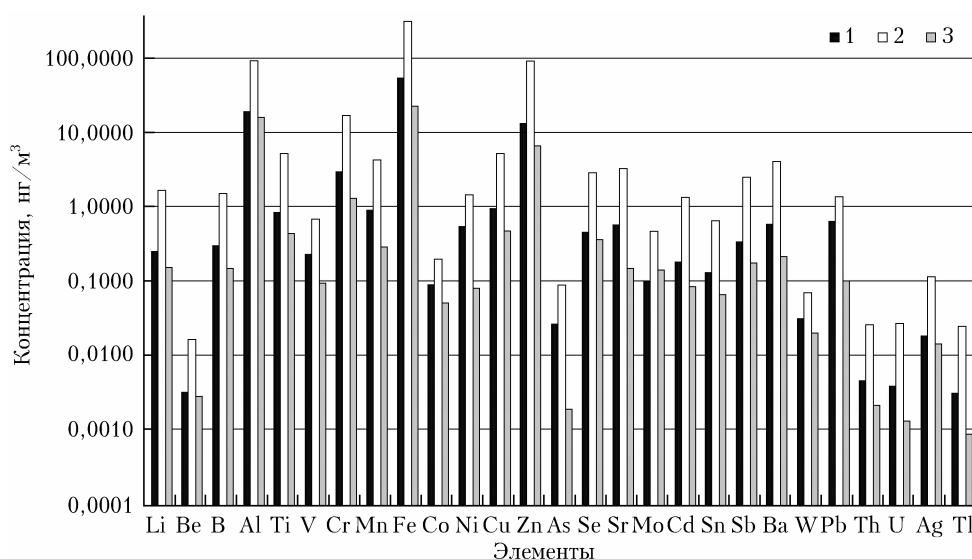


Рис. 3. Распределение средних концентраций микроэлементов (1) по сравнению с их распределением в пробах с высокой (№ 8К) (2) и низкой (№ 16К) (3) концентрациями в составе аэрозоля, собранного в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» 24 июня – 15 августа 2018 г.

Таблица 2

Средние концентрации ионов в составе аэрозоля ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) и сумма концентраций ионов ( $\Sigma_{\text{ион}}$ )  $\pm$  среднеквадратичные отклонения (в скобках указано число проб в экспедиции «Арктика-2018»)

Компонент	СЛО вдоль склонов арх. Новая Земля и Северная Земля (4)	Восточно-Сибирское море (5)	Море Лаптевых (7)	Карское, Баренцево моря (3)
$\text{Na}^+$	$0,09 \pm 0,10$	$0,09 \pm 0,07$	$0,55 \pm 0,69$	$0,87 \pm 0,17$
$\text{NH}_4^+$	$0,08 \pm 0,04$	$0,14 \pm 0,07$	$0,17 \pm 0,15$	$0,11 \pm 0,06$
$\text{K}^+$	$0,01 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,02$	$0,03 \pm 0,01$
$\text{Mg}^{2+}$	$0,01 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,06$	$0,06 \pm 0,00$
$\text{Ca}^{2+}$	$0,02 \pm 0,05$	$0,01 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,02$	$0,03 \pm 0,00$
$\text{Cl}^-$	$0,21 \pm 0,13$	$0,27 \pm 0,14$	$1,01 \pm 1,03$	$1,32 \pm 0,19$
$\text{NO}_3^-$	$0,01 \pm 0,00$	$0,01 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$
$\text{SO}_4^{2-}$	$0,08 \pm 0,08$	$0,04 \pm 0,02$	$0,15 \pm 0,14$	$0,18 \pm 0,02$
$\Sigma_{\text{ион}}$	$0,51 \pm 0,25$	$0,59 \pm 0,27$	$1,99 \pm 1,91$	$2,60 \pm 0,33$

( $r = 0,72$ ) и  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$  ( $r = 0,96$ ). В аэрозоле, собранном в районе 3 в ходе гидрологических работ вдоль  $125,9^\circ$  в.д., сумма концентраций ионов была выше:  $3,5 \text{ мкг}/\text{м}^3$  в пробе № 6Т, в центральной части моря (№ 7Т) она достигла  $5,5 \text{ мкг}/\text{м}^3$  и была максимальной за весь период экспедиции. Максимум концентраций ионов совпал с самой высокой массовой концентрацией аэрозоля, измеренной в этом рейсе [37]. Повышенные суммы ионов  $1,9$  и  $1,6 \text{ мкг}/\text{м}^3$  наблюдались также в западной части района 3 в пробах № 13Т и № 15Т соответственно и в районе 4 в пробах № 18Т, 19Т –  $2,8 \text{ мкг}/\text{м}^3$  и  $2,4 \text{ мкг}/\text{м}^3$ . В составе аэрозоля при повышенных суммах ионов преобладали  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Корреляция концентраций отсутствовала в паре  $\text{NH}_4^+ - \text{SO}_4^{2-}$ , но появилась в парах ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  с  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0,77-0,90$ ). Отмечена высокая корреляция концентраций иона  $\text{Cl}^-$  с катионами  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  ( $r = 0,88-0,97$ ), отсутствует корреляция с ионом  $\text{NH}_4^+$ .

При рассмотрении каждой отдельной пробы были выявлены высокие значения КО калия и кальция вблизи о-ва Комсомолец (№ 3Т) ( $K_{(\text{K}^+/\text{Na}^+)} = 14,8$ ;  $K_{(\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)} = 30$ ) и калия в пробах № 8Т–11Т (12–16 сентября) в районе 2 ( $K_{(\text{K}^+/\text{Na}^+)} = 3,8-13,9$ ).

Проанализированные обратные траектории переноса воздушных масс и карта лесных пожаров от 21 августа 2018 г. при отборе пробы № 3Т свидетельствовали об интенсивных лесных пожарах на территории Сибирского федерального округа и переносе дымового аэрозоля в районе исследования [24, 25]. Повышенные КО в пробах, собранных 12–16 сентября, на фоне низких сумм концентраций суммы ионов и низких значений счетной концентрации частиц и массовой концентрации аэрозоля, но повышенных концентраций сажи [37] и ионов  $\text{NH}_4^+$  могут, скорее всего, свидетельствовать о континентальных выносах.

По сравнению с результатами, полученными в Северной Атлантике, различие ионного состава в отдельных районах экспедиции «Арктика-2018» оказалось значительным, поэтому их пространствен-

ное осреднение некорректно. Североатлантический аэрозоль по ионному составу отличался от арктического аэрозоля разных районов. Так, например, в аэрозоле района 1 концентрации исследуемых ионов были в 4–10 раз ниже, чем в районах Северной Атлантики, в районе 2 – в 2–17 раз. В море Лаптевых и Северной Атлантике концентрации ионов морского происхождения  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  были равны, а в составе Карского и Баренцева морей – выше, чем в аэрозоле Северной Атлантики (в 1,2–1,9 раза). Концентрации  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  в североатлантическом аэрозоле были выше в 3–5 раз, чем в Карском и Баренцевом морях.

Как и для Северной Атлантики, был проанализирован микроэлементный состав. Сумма концентраций элементов изменялась от 2,2 до  $13,5 \text{ нг}/\text{м}^3$ . Условно выделены три диапазона сумм с минимальными значениями от 2,2 до 3,8, средними от 6,1 до 9,0 и повышенными от 10,2 до  $13,5 \text{ нг}/\text{м}^3$ . Низкие концентрации микроэлементов в летние месяцы 2018 г. наблюдались в аэрозоле Северного Ледовитого океана (№ 2Т–4Т) и высокоширотных районах моря Лаптевых (№ 5Т), средние – в северной части района 1 (№ 1Т), в районе 2 (№ 10Т, 11Т), по разрезу  $125,9^\circ$  в.д. в районе 3 (№ 6Т) и в районе 4 (№ 18Т, 19Т). Повышенные концентрации микроэлементов отмечались преимущественно в аэрозоле над акваториями моря Лаптевых и Карского моря (№ 7Т–9Т, 12Т–17Т). В отличие от ионного состава различия концентраций микроэлементов в отдельных районах исследования оказались меньше среднеквадратических отклонений, в связи с чем средние значения можно считать типичными для всего района измерений этого периода наблюдений. Высокие концентрации определены для наиболее распространенных в земной коре элементов Al, Cu, Zn (рис. 4), почти на порядок и более ниже концентрации Fe, Ni, Ti, Sb, Li, Mn, Cr, Sr.

Выявлены высокие коэффициенты обогащения ( $K = 20860-41500$ ) для группы элементов Cd, Se, Sb антропогенного происхождения. Вторую группу с  $K = 1170-5580$  составляют Sn, Cu, W, Zn, Tl как антропогенного, так и преимущественно почвенно-

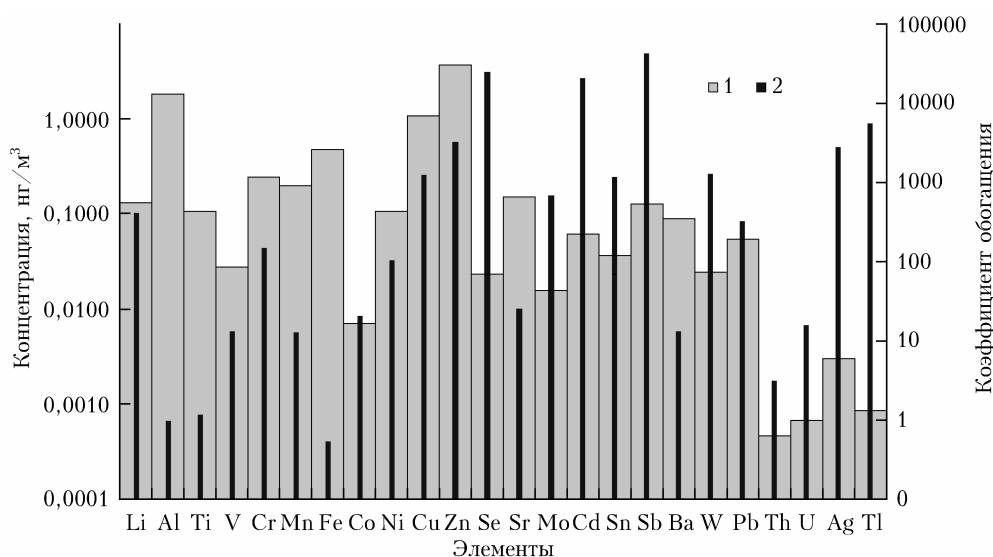


Рис. 4. Средние концентрации (1) и коэффициенты обогащения (2) микроэлементов в составе аэрозоля, собранного в атмосфере Российской Арктики за время морской экспедиции «Арктика-2018» 12 августа – 29 сентября 2018 г.

эрозионного происхождения. В меньшей степени обогащены элементы Pb, Mo, Li, Ni, Cr ( $K = 110-690$ ) (рис. 4). Коэффициенты Mn, V, Ba, U, Co, Sr, Fe, Al, Th, Ti ( $K = 1-26$ ) свидетельствуют о литофильном происхождении элементов. Как и для ионов, в аэрозоле над Северной Атлантикой, наблюдались более высокие концентрации микроэлементов (выше в 1,3–20 раз), что может указывать на различные источники поступления микроэлементов в атмосферу над Североатлантическим районом и арктическими морями. Сравнение концентраций элементов с измерениями, выполненными А.А. Виноградовой и В.П. Шевченко с соавторами в 1990-х гг. [35, 38], указывает на их многократное снижение. Изменился также порядок расположения элементов по возрастанию концентраций.

Идентифицировались ПАУ: нафталин, аценафтилен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(е)пирен, бенз(а)пирен, перилен, индено(1,2,3-с,д)пирен, бензо(г,и)перилен, дибенз[а,и]антрацен. Суммарное содержание ПАУ в аэрозоле изменялось от 0,57 до 0,86  $\text{нг}/\text{м}^3$ . Наиболее высокие концентрации определены над морем Лаптевых (№ 7Т – 2,61  $\text{нг}/\text{м}^3$ ; № 14 – 3,38  $\text{нг}/\text{м}^3$ ), а также в атмосфере района 2 (№ 10Т – 7,75  $\text{нг}/\text{м}^3$ ). Повышенные суммы концентраций ПАУ в пробах № 7Т, 13Т, 14Т хорошо согласуются с повышенными концентрациями ионов и микроэлементов в составе аэрозоля. Суммы концентрации ПАУ в центральной части Российской Арктики сравнимы с измерениями летне-осеннего периода 2002 г. на ст. Валькаркай Чукотского региона Арктики (0,1–2,1  $\text{нг}/\text{м}^3$ , среднее значение 0,87  $\text{нг}/\text{м}^3$ ) [39], а также с концентрациями ПАУ в западной части Российской Арктики (пос. Баренцбург, арх. Шпицберген) 0,36–1,7  $\text{нг}/\text{м}^3$  в сентябре – октябре 2017 г. Источник поступления ПАУ в окружающую среду – горение органическо-

го топлива: угля, жидкого горючего и древесины. Для их выявления рассчитаны диагностические соотношения некоторых ПАУ в аэрозолях. Результаты сопоставимы со значениями аналогичных соотношений для процессов горения разных видов топлива [40].

### 2.3. Химический состав аэрозоля на маршруте НИС «Профессор Мультановский»

Пробы аэрозоля отбирались над акваториями дальневосточных и арктических морей России (см. рис. 1). Суммарная концентрация ионов в составе аэрозоля изменялась от 0,6 до 11,3  $\text{мкг}/\text{м}^3$ , с максимумом в районе Берингова пролива (№ 5М). Среди дальневосточных морей наиболее высокие концентрации определены в аэрозоле Охотского моря (№ 1М). Наблюдалось увеличение концентраций ионов в аэрозоле от Камчатского залива (№ 2М) до Чукотского моря (№ 3М, 4М, 6М, табл. 3), а также повышенные концентрации ионов в аэрозоле над акваторией Восточно-Сибирского моря, особенно в его восточной части (№ 7М). Возможно, этому способствовали метеорологические условия: высокая влажность, густой туман, ветер и наличие льдов. В высокоширотной центральной части маршрута (№ 8М–12М) концентрации ионов значительно отличались от высоких концентраций ионов в аэрозоле Чукотского (№ 6М) и Восточно-Сибирского (№ 7М) морей (среднее  $5,7 \pm 1,3 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ) как по сумме (среднее  $1,2 \pm 0,6 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ), так и для отдельных ионов (в 3,2–6,2 раз). Небольшое увеличение концентраций ионов отмечалось в акватории моря Лаптевых (№ 9М) и Карского моря (№ 10М). Повышены концентрации ионов в более южной части маршрута (№ 13М, 14М). На атмосферу этих морей сильно влияют континентальные источники аэрозоля. В аэрозоле по всему маршруту преобладала

Таблица 3

**Концентрации ионов, сумма концентраций ионов ( $\Sigma_{\text{ион}}$ , мкг/м<sup>3</sup>) и микроэлементов ( $\Sigma_{\text{Э}}$ , нг/м<sup>3</sup>) в пробах аэрозоля, отобранных в экспедиции НИС «Профессор Мультановский» (июль – сентябрь 2019 г.)**

Номер пробы	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma_{\text{ион}}$	$\Sigma_{\text{Э}}$
1М	1,61	0,06	0,17	0,12	0,12	2,22	0,12	1,03	5,45	61,7
2М	0,60	0,02	0,07	0,04	0,05	0,71	0,12	0,22	1,83	80,5
3М	0,81	0,01	0,05	0,06	0,06	1,15	0,35	0,41	2,90	54,0
4М	1,05	0,02	0,09	0,08	0,09	1,45	0,01	0,43	3,22	73,8
5М	3,84	0,01	0,26	0,33	0,21	5,48	0,09	1,06	11,28	98,9
6М	2,23	0,01	0,18	0,26	0,15	3,10	0,07	0,59	6,59	60,7
7М	1,60	0,01	0,11	0,15	0,09	2,06	0,08	0,66	4,76	51,8
8М	0,16	0,01	0,02	0,02	0,02	0,21	0,05	0,15	0,64	35,5
9М	0,54	0,03	0,05	0,05	0,05	0,70	0,06	0,23	1,71	39,2
10М	0,64	0,01	0,05	0,06	0,06	0,93	0,03	0,21	1,99	80,0
11М	0,25	0,02	0,02	0,02	0,03	0,32	0,02	0,21	0,89	33,1
12М	0,21	0,01	0,03	0,02	0,03	0,31	0,06	0,15	0,82	48,1
13М	0,96	0,02	0,07	0,09	0,08	1,21	0,09	0,43	2,95	47,3
14М	0,99	0,01	0,06	0,09	0,07	1,36	0,11	0,47	3,16	48,3

морская составляющая – ионы натрия и хлоридов. Характерная особенность ионного состава аэрозоля – высокие концентрации K<sup>+</sup> в дальневосточной части маршрута. Возможной причиной могло быть влияние действующих вулканов Камчатки и Курильских о-вов, у которых преобладает умеренно-калиевый тип магм и эмиссий вулканических продуктов [41], а также последствия интенсивных лесных пожаров в Якутии и Сибири в летний период 2019 г., рекордные за последние несколько лет.

Расчеты показали повышенные коэффициенты  $K_{(K^+/Na^+)}$ ,  $K_{(Ca^{2+}/Na^+)}$  и  $K_{(SO_4^{2-}/Na^+)}$ . Наибольшее обогащение выявлено для ионов K<sup>+</sup>. За исключением иона NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, прослеживается близость концентраций ионов в аэрозоле Карского моря и моря Лаптевых со средними концентрациями ионов, измеренными в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш».

В распределении микроэлементов и ионов в составе аэрозоля прослеживается пространственная неоднородность. Наиболее высокие концентрации микроэлементов в составе аэрозоля определены в дальневосточной части маршрута (Чукотское, Северо-Восточное моря) и над акваторией Карского моря (№ 10М), максимальные – над Беринговым проливом (№ 5М). По всему маршруту наблюдались очень высокие концентрации Al, Fe и Zn. Необходимо также отметить повышенные концентрации Cu в аэрозоле над Камчатским заливом, Cd над акваторией Карского моря по разрезу 75° с.ш. и Sn в юго-западной части Карского моря (№ 12М). Концентрации микроэлементов Cu, Zn, Se, Cr, Al, Ba, Cd, Pb, Fe, Sr, V в составе аэрозоля над дальневосточными морями в 1,1–2,8 раза выше, чем в арктических морях. Максимальное превышение в 9,4 раза выявлено для Ni. Коэффициенты обогащения аэрозоля, превышающие 10<sup>5</sup>, определены для Se над дальневосточными морями и для Sn, Mo и Se над арктическими морями.

### Заключение

По результатам трех морских экспедиций определен химический состав аэрозоля над Северной Атлантикой, морями СЛО и Дальнего Востока. Измерения выполнялись в июне – сентябре 2018 г. и июле – сентябре 2019 г. Сравнение ионного состава аэрозоля выявило следующие особенности. В Северной Атлантике и европейской части СЛО близость концентраций ионов в разных районах исследования позволила рассчитать средние характеристики химического состава аэрозоля в целом для всего района измерений. Наблюдалось сходство концентраций ионов в аэрозоле Северной Атлантики (за исключением NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) с данными в море Лаптевых и Карском море, измеренными в 2018 г. на НЭС «Академик Трешников» и в 2019 г. на НИС «Профессор Мультановский». Наблюдается хорошая корреляция ионного состава аэрозоля, измеренная в 2018 и 2019 гг. в районах СЛО севернее арх. Новая Земля и Северная Земля и вблизи Восточно-Сибирского моря. Средняя концентрация суммы микроэлементов, измеренная в центральной части Российской Арктики, на порядок ниже, чем в Северной Атлантике, и почти в 7 раз ниже результатов, полученных для окраинных арктических морей России в 2019 г. Возможной причиной могли быть последствия лесных пожаров на территории Сибири и Якутии в 2019 г. В сравнении с результатами А.А. Виноградовой, полученными в 1990-х гг., отмечается снижение концентраций преимущественно антропогенных элементов Cu, Se, Mo, Cd, Sb, W, Pb. Среди микроэлементов наблюдается отличие в распределении концентраций в составе аэрозоля Северной Атлантики и центрального района Российской Арктики, что может свидетельствовать о разных источниках этих компонентов. Наиболее высокие концентрации микроэлементов – в аэрозоле Северной Атлантики и над арктическими

морями. Характерно, что коэффициенты обогащения металлов, рассчитанные для измерений каждого рейса, были наиболее высокими для одних и тех же компонентов Ni, Cu, Zn, Se, Mo, Cd, Sb, W, Pb.

ПАУ поступают в атмосферу в результате горения органического топлива: угля, жидкого горючего и древесины. Для выявления источников поступления ПАУ в атмосферу исследуемого района Арктики рассчитаны диагностические соотношения некоторых ПАУ в аэрозолях. Соотношение флуорантен/флуорантен + пирен, свидетельствующее о горении органического топлива, изменялось от 0,49 до 0,64. Соотношение индено(1,2,3-с,d)пирен/индено(1,2,3-с,d)пирен + бензо(g,h,i)перилен (0,40–0,49) в пробах № 10, № 14, № 17 с высоким суммарным содержанием ПАУ также идентифицируется как горение природного топлива. Соотношение бенз(b)флуорантен/ бенз(k)флуорантен (1,1–2,2) указывает на горение жидкого топлива. Измерения химического состава аэрозоля, собранного в морских экспедиционных рейсах, имеют большое значение для полного представления о пространственных и временных неоднородностях химического состава аэрозоля арктического района.

Работа выполнялась в рамках комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН П.1 (проекты № АААА-А17-117122190017-8, АААА-А17-117021310142-5), программы работ Российской научной арктической экспедиции на арх. Шпицберген (РАЭ-Ш) ФГБУ «АНИИ», подпрограммы 4 «Организация и обеспечение работ и научных исследований в Арктике и Антарктике» государственной программы РФ «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 гг., гранта РНФ № 14-50-00095. Аналитические работы выполнены по проекту № 0345–2019–0008 в приборном центре коллективного пользования физико-химического ультрамикрoанализа ЛИН СО РАН.

1. Kaufman Y.J., Koren I., Remer L.A., Rosenfeld D., Rudich Y. The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean // PNAS. 2005. V. 102, N 32. P. 11207–11212. DOI: 10.1073/pnas.05051911102.
2. Lee E.-H., Sohn B.-J. Recent increasing trend in dust frequency over Mongolia and Inner Mongolia regions and its association with climate and surface condition change // Atmos. Environ. 2011. V. 45, N 27. P. 4611–4616. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.05.065.
3. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Лубо-Лесниченко К.Е., Прахов А.Н. Обобщение результатов измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы на арх. Шпицберген в 2011–2016 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 948–955; Sakerin S.M., Kabanov D.M., Radionov V.F., Chernov D.G., Turchinovich Yu.S., Lubo-Lesnichenko K.E., Prakhov A.N. Generalization of results of atmospheric aerosol optical depth measurements on Spitsbergen Archipelago in 2011–2016 // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 2. P. 163–170.
4. Schneider S.H. The greenhouse effect: Science and policy // Science. 1989. V. 243, N 4892. P. 771–781. DOI: 10.1126/science.243.4892.771.
5. Robinson A.B., Robinson N.E., Soon W. Environmental effects of increased atmospheric Carbon Dioxide // J. Am. Phys. Surg. 2007. V. 12, N 3. P. 79–90.
6. Kramm G., Dlugi R. Scrutinizing the atmospheric greenhouse effect and its climatic impact // Nat. Sci. 2011. V. 3. P. 971–998. DOI: 10.4236/ns.2011.312124.
7. Wilmes S.B., Raible C.C., Stocker T.F. Climate of the Past: Climate variability of the mid- and high-latitudes of the Southern Hemisphere in ensemble simulations from 1500 to 2000 AD // Clim. Past. 2012. V. 8, N 1. P. 373–390. DOI: 10.5194/cp-8-373-2012.
8. Barnes E. A., Polvani L.M. CMIP5 projections of Arctic amplification, of the North American/North Atlantic circulation, and of their relationship // J. Clim. 2015. V. 28, N 13. P. 5254–5271. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00589.1.
9. Fisher J.A., Jacob D.J., Wang Q., Bahreini R., Carrouge C.C., Cubison M.J., Dibb J.E., Diehl T., Jimenez J.L., Leibensperger E.M., Lu Z., Meinders M.B.J., Pye H.O.T., Quinn P.K., Sharma S., Streets D.G., Van Donkelaar A., Yantosca R.M. Sources, distribution, and acidity of sulfate–ammonium aerosol in the Arctic in winter–spring // Atmos. Environ. 2011. V. 45, N 39. P. 7301–7318. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.08.030.
10. Fenger M., Surensen L.L., Kristensen K., Jensen B., Nguyen Q.T., Nojgaard J.K., Massling A., Skov H., Becker T., Glasius M. Sources of anions in aerosols in northeast Greenland during late winter // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, N 3. P. 1569–1578. DOI: 10.5194/acp-13-1569-2013.
11. Udisti R., Bazzano A., Becagli S., Bolzacchini E., Caiazza L., Cappelletti D., Ferrero L., Frosini D., Giardi F., Grotti M., Lupi A., Malandrino M., Mazza M., Moroni B., Severi M., Traversi R., Viola A., Vitale V. Sulfate source apportionment in the Ny-Alesund (Svalbard Islands) Arctic aerosol // Rendiconti Lincei-Scienze Fisiche Naturali. 2016. V. 27. P. 85–94. DOI: 10.1007/s12210-016-0517-7.
12. Виноградова А.А., Котова Е.И., Топчая В.Ю. Атмосферный перенос тяжелых металлов в районы севера Европейской территории России // География и природные ресурсы. 2017. № 1. С. 108–116. DOI: 10.21782/gipr0206-1619-2017-1(108-116).
13. Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н. Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 482–487; Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N. Anomalous wildfires in 2010 and 2012 on the territory of Russia and supply of Black Carbon to the Arctic // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 545–550.
14. Clausen H.B., Hammer C.U. The Laki and Tambora eruptions as revealed in Greenland ice cores from 11 locations // Ann. Glaciology. 1988. V. 10. P. 16–22. DOI: https://doi.org/10.3189/S0260305500004092.
15. Израэль Ю.А. Радиоактивное загрязнение природных сред в результате аварии на Чернобыльской атомной станции. М.: Комтехпринт, 2006. 28 с.
16. Campbell G., Lee D.S. Atmospheric deposition of sulphur and nitrogen species in the UK // Freshwater Biol. 1996. V. 36, N 1. P. 151–167. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1996.00076.x.
17. Abrahamsen G., Stuanes A.O., Tveite B. Effect of long range transported air pollutants in Scandinavia // Water Qual. Bull. 1983. V. 8, N 2. P. 89–95.
18. Moiseenko T.I. Critical load of  $SO_4^{2-}$  for surface waters in the Kola Region of Russia // Water, Air, and Soil Pollut. 1996. V. 2. P. 19–39.



19. Galloway J.N. Acidification of the world: Natural and anthropogenic // *Water, Air, and Soil Pollut.* 2001. V. 130. N 1–4. P. 17–24. URL: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1012272431583>.
20. Obolkin V., Khodzher T., Sorokovikova L., Tomberg I., Netsvetayeva O., Golobokova L. Effect of long-range transport of sulphur and nitrogen oxides from large coal power plants on acidification of river waters in the Baikal region, East Siberia // *Int. J. Environ. Stud.* 2016. V. 73, N 3. P. 452–461. DOI: 10.1080/00207233.2016.1165481.
21. Xu G., Gao Y. Atmospheric trace elements in aerosols observed over the Southern Ocean and coastal East Antarctica // *Polar Res.* 2014. V. 33. 23973. DOI: <http://dx.doi.org/10.3402/polarv.33.23973>.
22. GAW (Global Atmosphere Watch). Manual for the gaw precipitation chemistry programme. WMO-GAW Report N 160 / M.A. Allan (ed.) [Electronic resource]. URL: <http://qasac-americas.org> (last access: 17.12.2019).
23. EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia) 1998–2018. Report of the Inter-Laboratory Comparison Project [Electronic resource]. URL: <http://www.eanet.asia/product/index.html> (last access: 17.12.2019).
24. Карта пожаров [Электронный ресурс]. URL: <https://fires.ru> (дата обращения: 15.11.2019).
25. ARL NOAA Atmospheric Resource Laboratory NOAA [Electronic resource]. URL: <http://www.arl.noaa.gov> (last access: 12.11.2019).
26. Сакерин С.М., Зенкова П.Н., Кабанов Д.М., Калашикова Д.А., Лисицын А.П., Макаров В.И., Польшкин В.В., Попова С.А., Симонова Г.А., Чанкина О.В., Шевченко В.П. Результаты исследований физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 5. С. 358–367.
27. Cook P.A., Savage N.H., Turquetty S., Carver G.D., O'Connor F.M., Heckel A., Stewart D., Whalley L.K., Parker A.E., Schlager H., Singh H.B., Avery M.A., Sachse G.W., Brune W., Richter A., Burrows J.P., Purvis R., Lewis A.C., Reeves C.E., Monks P.S., Levine J.G., Pyle J.A. Forest fire plumes over the North Atlantic: p-TOMCAT model simulations with aircraft and satellite measurements from the ITOP/ICARTT campaign // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D10S43. DOI: 10.1029/2006JD007563.
28. Barnaba F., Angelini F., Curci G., Gobbi G.P. An important fingerprint of wildfires on the European aerosol load // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 10487–10501. DOI: 10.5194/acp-11-10487-2011.
29. Tsunogai S., Saito O., Yamada K., Nakay S. Chemical composition of oceanic aerosol // *J. Geophys. Res.* 1972. V. 77. P. 5283–5292.
30. Urbanski S.P., Hao W.M., Baker S. Chemical composition of wildland fire emissions // *Develop. Environ. Sci.* 2009. V. 8. P. 79–107. DOI: 10.1016/S1474-8177(08)00004-1.
31. Bodi M.B., Martin D.A., Balfour V.N., Santin C., Dorr S.H., Pereira P., Cerda A., Mataix-Solera J. Wildland fire ash: Production, composition and eco-hydrogeomorphic effects // *Earth-Sci. Rev.* 2014. N 130. P. 103–127. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.07.005.
32. Yli-Tuomi T., Venditte L., Hopke P.K., Basunia M.S., Landsberger S., Viisanen Y., Paatero J. Composition of the Finnish Arctic aerosol: Collection and analysis of historic filter samples // *Atmos. Environ.* 2003. V. 37, N 17. P. 2355–2364.
33. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
34. Дауэвальтер В.А., Дауэвальтер М.В., Салтан Н.В., Семенов Е.Н. Химический состав атмосферных выпадений в зоне влияния комбината «Североникель» // *Геохимия.* 2008. № 10. С. 1131–1136.
35. Виноградова А.А. Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // *Изв. АН. Физ. атмосф. и океана.* 1993. Т. 29, № 4. С. 437–456.
36. Интерпретация геохимических данных / под ред. Е.В. Склярова. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.
37. Радионов В.Ф., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Сакерин С.М., Изосимова О.Н. Характеристики аэрозоля над арктическими морями Евразии: результаты измерений 2018 года и среднее пространственное распределение в летне-осенние периоды 2007–2018 гг. // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2019. № 4. С. 405–421. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-405-421.
38. Shevchenko V., Lisitzin A., Vinogradova A., Stein R. Heavy metals in aerosols over the seas of the Russian Arctic // *Sci. Total Environ.* 2003. V. 306. P. 11–25.
39. Никитин В.А., Коноплев А.В., Булгаков А.А. Зависимость содержания стойких органических загрязняющих веществ в атмосфере российской Арктики от температуры приземного слоя воздуха // *Метеорол. и гидрол.* 2006. № 6. С. 44–52.
40. Heintzenberg J., Hansson H.-C., Lannefors H. The chemical composition of arctic haze at Ny-Alesund, Spitsbergen // *Tellus.* 1981. V. 33, N 2. P. 162–171. DOI: 10.3402/tellusa.v33i2.10705.
41. Пономарева В.В., Портнягин М.В., Мельников Д.В. Состав тefры современных (2009–2011 гг.) извержений вулканов Камчатки и Курильских островов // *Вестн. КРАУНЦ. Науки о земле.* 2012. Вып. 20. № 2. С. 23–37.

L.P. Golobokova, T.V. Khodzher, O.N. Izosimova, P.N. Zenkova, A.O. Pochuyarov, O.I. Khuriganova, N.A. Onishyuk, I.I. Marinayte, V.V. Polkin, V.F. Radionov, S.M. Sakerin, A.P. Lisitzin, V.P. Shevchenko. **Chemical composition of atmospheric aerosol in the Arctic region along the routes of the research cruises in 2018–2019.**

The chemical composition (ions, elements, polycyclic aromatic hydrocarbons) of atmospheric aerosol in the North Atlantic, in the European and Russian parts of the Arctic Ocean and in the seas of the northern latitudes and the Far East was analyzed. The studies were carried out on board the research vessels along their cruise routes (RV “Akademik Treshnikov”, RV “Akademik Mstislav Keldysh”, RV “Professor Multanovsky”). The air was sampled using the methodology accepted by the international networks operating under the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET) and European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP). The analysis of the chemical composition of the aerosol along the routes of the research cruises showed the following below. The total ion content and the concentrations of individual ions in the aerosol of the North Atlantic and in the European part of the Arctic Ocean correspond to the data that was obtained within the measurement work fulfilled in the Laptev and Kara Seas in 2018 and 2019. The increased values of the sum of PAHs in Russia’s central regions in the Arctic correspond quite well to the increased concentrations of ions and trace elements in the content of the aerosol. Trace elements are noted to have different concentrations in the content of the aerosols of the North Atlantic and Russia’s central regions of the Arctic. This fact can point at different sources of these components.